

Halbleitertechnologie von A bis Z

Lithografie

EUV-Anlagentechnik	3
<i>Die Lichtquelle - Laser-erzeugtes Plasma (LPP)</i>	3
<i>Projektionsoptik und Scanner-Prinzip</i>	3
<i>EUV-Fotolackchemie</i>	4

EUV-Anlagentechnik

Die Lichtquelle – Laser-erzeugtes Plasma (LPP)

Die Erzeugung der EUV-Strahlung ist der technisch aufwendigste Teil der gesamten Anlage. Ein Tröpfchengenerator schießt geschmolzenes Zinn in Tropfen von etwa 20 µm Durchmesser mit rund 50.000 Tropfen pro Sekunde in die Vakuumkammer. Jeder Tropfen wird zunächst von einem schwachen Vorpuls eines CO₂-Lasers getroffen, der ihn zu einer flachen Scheibe verformt und damit die Angriffsfläche für den folgenden Hauptpuls vergrößert. Erst dieser Hauptpuls, ein Hochleistungs-CO₂-Laser mit einer mittleren Leistung von rund 20 kW, heizt das Zinn auf mehrere hunderttausend Grad auf und erzeugt ein hochionisiertes Zinn-Plasma, das bei 13,5 nm im EUV-Bereich emittiert (siehe [Herausforderungen und Kosten](#)).

Der Wirkungsgrad dieser Umwandlung ist gering: Nur rund 5 % der eingesetzten Laserenergie verlassen die Quelle als nutzbare EUV-Strahlung, der Rest wird als Wärme und als energiereiche Ionen frei. Ein gekrümmter Kollektorspiegel unmittelbar hinter der Plasmaquelle bündelt die Strahlung Richtung Beleuchtungsoptik – er ist damit dem heißesten und schmutzigsten Teil der Anlage direkt ausgesetzt. Zinnpartikel und -ionen schlagen sich auf seiner Oberfläche nieder und würden die Reflektivität des Multilagenspiegels innerhalb kurzer Zeit ruinieren. Dagegen wird permanent Wasserstoffgas in die Kammer eingeleitet: Es reagiert mit dem abgelagerten Zinn zu gasförmigem Stannan (SnH₄), das kontinuierlich abgepumpt wird und den Spiegel so von Debris freihält.

Projektionsoptik und Scanner-Prinzip

Von der Quelle gelangt die Strahlung über ein Beleuchtungssystem aus mehreren Spiegeln zur Maske, das den Strahl homogenisiert und auf das gewünschte Beleuchtungssetting formt. Da die EUV-Maske ein Spiegel ist, muss der Strahl schräg auf sie treffen, um einfallendes und reflektiertes Licht trennen zu können – eine Randbedingung, die es bei transmissiven DUV-Masken nicht gibt (siehe [Reflexionsmasken für die EUV-Belichtung](#)). Das von der Maske reflektierte, strukturierte Licht durchläuft anschließend die Projektionsoptik: ein System von typischerweise sechs bis acht asphärischen Spiegeln, die das Bild um den Faktor 4 verkleinert auf den Wafer abbilden.

Jeder einzelne dieser Spiegel reflektiert nur rund 70 % der auftreffenden Strahlung; bei sechs Spiegeln im Strahlengang kommen so nur noch wenige Prozent der ursprünglich erzeugten Leistung am Wafer an. Die Spiegel selbst

gehören zu den präzisesten optischen Bauteilen, die je gefertigt wurden – Formfehler müssen im Bereich weniger Pikometer liegen, da schon kleinste Abweichungen bei einer Wellenlänge von 13,5 nm die Abbildung verzerren. Weil sich diese extreme Präzision nur über einen schmalen, bogenförmigen Bildausschnitt halten lässt, wird nicht das gesamte Feld auf einmal belichtet: Maske und Wafer bewegen sich synchron durch einen schmalen Belichtungsschlitz (Step-and-Scan), bis das gesamte Chipfeld abgerastert ist. Die High-NA-Generation treibt dieses Prinzip weiter: Durch die anamorphe Optik wird das nutzbare Feld pro Belichtung nochmals halbiert, was die Scan-Strategie zusätzlich verkompliziert (siehe [High-NA-EUV](#)).

EUV-Fotolackchemie

Klassische chemisch verstärkte Fotolacke (CAR), wie sie bei DUV eingesetzt werden, stoßen bei EUV an eine grundsätzliche Grenze: das RLS-Trilemma aus Resolution, Line Edge Roughness und Sensitivity. Weil die einzelnen EUV-Photonen deutlich energiereicher sind als DUV-Photonen, liefert dieselbe Dosis (Energie pro Fläche) am Wafer sehr viel weniger Photonen – und damit ein stärker verrauschtes Belichtungsbild (siehe [Shot Noise](#)). Jedes absorbierte Photon löst außerdem ein Photoelektron und eine Kaskade von Sekundärelektronen aus, die sich einige Nanometer weit im Lack ausbreiten, bevor sie ihre Energie abgeben. Dieser Elektronen-Blur verwischt die eigentlich scharfe Belichtungskante und wird bei den kleinsten Strukturgrößen zum limitierenden Faktor – unabhängig davon, wie gut die Optik selbst noch abbilden könnte.

Ein Ausweg sind Metalloxid-Resists auf Basis von Zinn- oder Hafniumoxid-Clustern. Die schweren Metallatome besitzen einen deutlich höheren Absorptionsquerschnitt für EUV-Strahlung als die leichten Kohlenstoffverbindungen klassischer CAR-Lacke, sodass für dieselbe Belichtungswirkung weniger Photonen nötig sind und der Elektronen-Blur räumlich enger begrenzt bleibt. Diese Lacke werden zunehmend nicht mehr aufgeschleudert, sondern trocken über einen ALD-ähnlichen Gasphasenprozess abgeschieden, was Defekte durch ungleichmäßige Benetzung vermeidet und sich einfacher in die übrige Vakuumkette der Anlage integrieren lässt. Vollständig gelöst ist das Grundproblem damit nicht: Die Stochastik bleibt, wie bereits im Kapitel [Belichtungsverfahren der nächsten Generation](#) beschrieben, neben Overlay und Kosten eine der zentralen Grenzen der EUV-Lithografie.